

## СЕЧЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ИЗОТОПОВ $^{43}\text{Sc}$ , $^{44}\text{Sc}$ И $^{46}\text{Sc}$ В РЕАКЦИИ $^{45}\text{Sc} + ^3\text{He}$

*Н. К. Скобелев*<sup>а, 1</sup>, *А. А. Кулько*<sup>а</sup>, *Ю. Э. Пенюнжкевич*<sup>а</sup>,  
*Е. И. Воскобойник*<sup>а</sup>, *В. Крога*<sup>б</sup>, *В. Бурьян*<sup>б</sup>, *З. Гонс*<sup>б</sup>,  
*Я. Мразек*<sup>б</sup>, *Ш. Пискорж*<sup>б</sup>, *Е. Шимечкова*<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>б</sup> Институт ядерной физики АН Чехии, Ржеж, Чехия

В экспериментах, проведенных на пучке ионов  $^3\text{He}$  циклотрона У-120М Института ядерной физики Академии наук Чехии в Ржеже, при облучении скандиевых мишеней были исследованы реакции  $^{45}\text{Sc}(^3\text{He}, \alpha n)^{43}\text{Sc}$ ,  $^{45}\text{Sc}(^3\text{He}, \alpha)^{44}\text{Sc}$  и  $^{45}\text{Sc}(^3\text{He}, 2p)^{46}\text{Sc}$  в энергетическом диапазоне энергий  $^3\text{He}$  от 5 до 24 МэВ. Для определения выхода образовавшихся изотопов Sc использовалась активационная методика. Измерение наведенной в мишенях  $\gamma$ -активности проводилось с помощью HPGe-детектора высокого разрешения. Несмотря на малую энергию связи  $^3\text{He}$  и положительные значения  $Q$  реакций, приводящие к образованию изотопов  $^{44}\text{Sc}$  и  $^{46}\text{Sc}$ , поведение функций возбуждения с образованием этих изотопов отличается от поведения функций возбуждения на дейтронах. Сечения образования  $^{44}\text{Sc}$  достигают своего максимального значения на кулоновском барьере реакции. Это связано с тем, что в реакции помимо  $^{44}\text{Sc}$  образуется устойчивое ядро  $^4\text{He}$ .

In the experiments performed on the  $^3\text{He}$ -ion beam irradiation scandium targets at the U-120M cyclotron of the Institute of Nuclear Physics of the Czech Academy of Sciences, Rez,  $^{45}\text{Sc}(^3\text{He}, \alpha n)^{43}\text{Sc}$ ,  $^{45}\text{Sc}(^3\text{He}, \alpha)^{44}\text{Sc}$  and  $^{45}\text{Sc}(^3\text{He}, 2p)^{46}\text{Sc}$  reactions were investigated in the  $^3\text{He}$  energy range from 5 to 24 MeV. To determine the yield of resulting Sc isotope, activation technique was used. A measurement of  $\gamma$ -activity induced in the target was carried out using HPGe-detector of high resolution. Despite the low binding energy of  $^3\text{He}$  and positive values of  $Q$ -reactions leading to the formation of  $^{44}\text{Sc}$  and  $^{46}\text{Sc}$  isotopes, the behavior of excitation functions for the formation of these isotopes is different from the behavior of excitation functions for deuterons. Cross sections for  $^{44}\text{Sc}$  reach their maximum at the Coulomb barrier of the reaction. This is due to the fact that the stable core of  $^4\text{He}$  forms in the reaction in addition to  $^{44}\text{Sc}$ .

PACS: 25.40.Hs; 25.70.Hi

### ВВЕДЕНИЕ

Как было показано в ряде работ, структура слабосвязанных ядер может сильно влиять на взаимодействие с другими стабильными ядрами [1–4]. Это проявляется главным образом при энергиях, близких к кулоновскому барьеру реакций, где связь между различными каналами реакций становится существенной. В этом случае отдельные каналы реак-

---

<sup>1</sup>E-mail: skobelev@jinr.ru

ций могут оказывать сильное влияние из-за особенностей структуры взаимодействующих ядер. Например, реакции передачи нуклонов или целых кластеров могут доминировать при энергии бомбардирующих ионов ниже кулоновского барьера как из-за кластерной структуры ядра, так и из-за большого положительного значения  $Q$  реакции. Низкий порог развала слабосвязанных ядер приводит к диссоциации ядер на кластеры под влиянием кулоновского и ядерного взаимодействий.

Подобно радиоактивным ядрам с галоидальной структурой слабосвязанные ядра, такие как  ${}^6,7\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$  и др., также имеют низкий порог развала на кластеры и, следовательно, высокую вероятность их образования, находясь в возбужденном состоянии. Для ядра  ${}^6\text{Li}$  пороговая энергия возбуждения для образования кластеров  $\alpha + d$  равна 1,475 МэВ, для  ${}^7\text{Li}$  распад на кластеры  $\alpha + t$  наблюдается при энергии возбуждения около 2,47 МэВ. Эти значения такого же порядка, как и энергия отделения двух нейтронов от  ${}^6\text{He}$  или развала  ${}^6\text{He}$  на  ${}^4\text{He} + 2n$ , которая равна 0,975 МэВ.

Изучение механизмов реакций для ядер с гало и слабосвязанных ядер вызывает большой интерес у экспериментаторов и теоретиков. В свою очередь, величины сечений ядерных реакций являются важными характеристиками моделей, используемых для описания возбуждения и девозбуждения ядерных состояний.

Ряд ядерных реакций на стабильных пучках с передачей нуклонов приводит к радиоактивным продуктам реакций с положительным значением  $Q$  реакций. Можно ли ожидать каких-либо особенностей в реакциях со стабильными ядрами снарядов и мишеней, связанных со слиянием этих ядер и передачей нуклонов друг другу и имеющих положительное значение  $Q$ ? Таким интересным бомбардирующим стабильным ядром является  ${}^3\text{He}$  с малой энергией связи — 7,718 МэВ (2,572 МэВ/А). Из-за несколько меньшей энергии отделения протона от ядра  ${}^3\text{He}$  ( $S_p = 5,49$  МэВ) и низкой энергии отделения двух протонов  $S_{2p} = 7,71$  МэВ по сравнению с другими близкими по массе стабильными ядрами реакции с  ${}^3\text{He}$  должны приводить к увеличению вклада прямых реакций, таких как развал снаряда, реакции срыва и подхвата нуклонов.

Интерес к пониманию механизма слияния при низких энергиях возрос за последние годы в связи с проблемами синтеза сверхтяжелых трансурановых элементов и других ядер у границы ядерной стабильности. При попытках решить эти вопросы стало ясно, что процессы ядерных реакций вблизи кулоновского барьера менее понятны, чем обычно считалось. Эти исследования крайне важны для астрофизики, когда рассматриваются проблемы нуклеосинтеза и необходимо знать сечения реакций слияния, чтобы точнее представить сценарий образования ядер. Любая новая информация о влиянии подбарьерных процессов на взаимодействие атомных ядер может серьезно изменить наше представление о последовательной цепочке образования ядер.

Целью этой работы являлось исследование механизмов реакций, протекающих при бомбардировке  ${}^{45}\text{Sc}$  ионами  ${}^3\text{He}$ , путем анализа функций возбуждения с образованием в этих реакциях различных ядер-продуктов. В данной статье представлены результаты измерений сечений образования различных продуктов в реакции  ${}^3\text{He} + {}^{45}\text{Sc}$ , в том числе и с положительным значением  $Q$ . Экспериментальные функции возбуждения сравниваются с расчетными, построенными с использованием вычисленных сечений реакций по программам, учитывающим как чисто статистические равновесные процессы, так и процессы слияния с учетом связи каналов.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Эксперименты были выполнены на выведенном пучке  $^3\text{He}$  с энергией 24,5 МэВ циклотрона У-120М Института ядерной физики АН Чешской Республики в Ржеже с использованием активационной методики. Ускоренный пучок  $^3\text{He}$  был сфокусирован до размера  $5 \times 5$  мм. Энергия  $^3\text{He}$  измерялась с помощью магнитного анализатора, через который пропускался ток пучка. Энергетический разброс пучка был меньше 100 кэВ. Такой же энергетический разброс был оценен по упругому пику рассеянных частиц  $^3\text{He}$  на мишени из Au, измеренному с помощью полупроводниковых Si-детекторов и подтвердившему значение энергии  $^3\text{He}$ , равной  $(24,5 \pm 0,1)$  МэВ. В центре реакционной камеры на пути пучка  $^3\text{He}$  устанавливалась сборка мишеней, состоящая из 10 скандиевых моноизотопных фольг  $^{45}\text{Sc}$  (чистота не хуже 99 %) толщиной 4,8 мкм каждая. В сборку включались также четыре титановые фольги толщиной 2,1 мкм, используемые для мониторинга реакции на пучке  $^3\text{He} \text{ ест} \text{ Ti} (^3\text{He}, x) ^{48}\text{V}$  [5], с рекомендованными МАГАТЭ данными по сечениям образования нуклида  $^{48}\text{V}$ . Между мишенями для сброса энергии  $^3\text{He}$  устанавливались Al-фольги различной толщины от 5 до 50 мкм. Ток пучка  $^3\text{He}$  измерялся по электрическому заряду в цилиндре Фарадея, установленном непосредственно после мишенной сборки. Средняя интенсивность  $^3\text{He}$  составляла около 5 нА, что по соображениям радиационной безопасности позволило практически сразу же после извлечения мишеней из реакционной камеры начать измерения наведенной в них активности. Цикл облучения сборки длился 8 ч.

После окончания облучения сборка разбиралась, и в мишенях из Sc и Ti измерялась наведенная  $\gamma$ -активность. Первые измерения наведенной в мишенях  $\gamma$ -активности были проведены спустя 30 мин после окончания облучения. Все измерения проводились на HPGe-детекторе с 50 %-й эффективностью относительно NaJ и HWHM 1,8 кэВ для энергии  $\gamma$ -квантов 1,3 МэВ. Идентификация образовавшихся в реакциях нуклидов была проведена с учетом энергии  $\gamma$ -распада и времени жизни этих ядер с использованием ядерных данных, собранных в [6].

В табл. 1 даны возможные реакции, приводящие к образованию исследуемых изотопов Sc и V, значения периодов полураспада, энергии и интенсивностей  $\gamma$ -переходов

Таблица 1. Характеристики некоторых ядер — продуктов реакций [6]  $^{45}\text{Sc} + ^3\text{He}$  и  $\text{Ti} + ^3\text{He}$ 

Ядро	Реакция	Период полураспада	Энергия, кэВ	Интенсивность, %
$^{43}\text{Sc}$	$^{45}\text{Sc} (^3\text{He}, \alpha n) ^{43}\text{Sc}$	3,891 ч	372,71	23
$^{44}\text{Sc}$	$^{45}\text{Sc} (^3\text{He}, \alpha) ^{44}\text{Sc}$	3,927 ч	1157,031	99,9
$^{44m}\text{Sc}$	$^{45}\text{Sc} (^3\text{He}, \alpha) ^{44m}\text{Sc}$	58,6 ч	271,13	86,7
$^{46}\text{Sc}$	$^{45}\text{Sc} (^3\text{He}, 2p) ^{46}\text{Sc}$	83,79 сут	889,3 1120,545	99,98 99,987
$^{45}\text{Ti}$	$^{45}\text{Sc} (^3\text{He}, p2n) ^{45}\text{Ti}$	184,8 мин	425,1 720,22	0,0137 0,154
$^{48}\text{V}$	$^{\text{nat}}\text{Ti} (^3\text{He}, x) ^{48}\text{V}$	15,9735 сут	944,104 983,517 1312,096	7,76 99,98 97,5

для изотопов Sc и V, необходимые для идентификации этих изотопов и определения их выходов. Средняя энергия падающих на каждую мишень частиц, потери энергии и стрэглинг  ${}^3\text{He}$  в каждой фольге были рассчитаны с помощью кода SRIM 2011 [7] и программы LISE<sup>++</sup> [8]. В используемых нами сборках мишеней из Sc происходило поглощение энергии  ${}^3\text{He}$  с 24,5 до 5 МэВ. Расчет сечений образования продуктов ядерных реакций Sc и V выполнялся по методике, описанной в [3].

На рис. 1 представлен характерный энергетический  $\gamma$ -спектр, полученный при измерении наведенной активности в одной из скандиевых мишеней после облучения пуч-

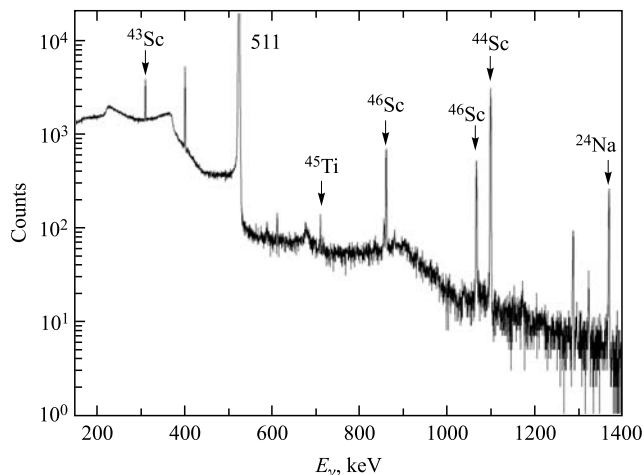


Рис. 1. Гамма-спектр, полученный при измерении в течение 30 мин облученной 4,8-мкм фольги из  ${}^{45}\text{Sc}$  пучком  ${}^3\text{He}$  с энергией 22,68 МэВ, спустя 5 ч после окончания облучения

Таблица 2. Возможные каналы реакций, приводящие к образованию исследуемых изотопов Sc, при облучении  ${}^{45}\text{Sc}$  ионами  ${}^3\text{He}$ , и рассчитанные значения  $Q$  реакций

Ядро	Реакция	$Q$ реакции, МэВ	Порог реакции, МэВ
${}^{43}\text{Sc}$	${}^{45}\text{Sc}({}^3\text{He}, \alpha n){}^{43}\text{Sc}$	-0,444	0,475
	${}^{45}\text{Sc}({}^3\text{He}, dt){}^{43}\text{Sc}$	-18,034	19,243
	${}^{45}\text{Sc}({}^3\text{He}, 2n{}^3\text{He}){}^{43}\text{Sc}$	-21,022	22,432
	${}^{45}\text{Sc}({}^3\text{He}, npt){}^{43}\text{Sc}$	-20,258	21,617
	${}^{45}\text{Sc}({}^3\text{He}, 2npd){}^{43}\text{Sc}$	-26,515	28,294
${}^{44g+m}\text{Sc}$	${}^{45}\text{Sc}({}^3\text{He}, \alpha){}^{44}\text{Sc}$	9,254	0
	${}^{45}\text{Sc}({}^3\text{He}, pt){}^{44}\text{Sc}$	-10,559	11,267
	${}^{45}\text{Sc}({}^3\text{He}, n{}^3\text{He}){}^{44}\text{Sc}$	-11,323	12,082
	${}^{45}\text{Sc}({}^3\text{He}, 2d){}^{44}\text{Sc}$	-14,591	15,570
	${}^{45}\text{Sc}({}^3\text{He}, npd){}^{44}\text{Sc}$	-16,816	17,944
	${}^{45}\text{Sc}({}^3\text{He}, 2n2p){}^{44}\text{Sc}$	-19,041	20,318
${}^{46}\text{Sc}$	${}^{45}\text{Sc}({}^3\text{He}, 2p){}^{46}\text{Sc}$	1,043	0
${}^{45}\text{Ti}$	${}^{45}\text{Sc}({}^3\text{He}, p2n){}^{45}\text{Ti}$	-15,626	16,674
	${}^{45}\text{Sc}({}^3\text{He}, dn){}^{45}\text{Ti}$	-13,402	14,301
	${}^{45}\text{Sc}({}^3\text{He}, t){}^{45}\text{Ti}$	-7,145	7,624

ком  $^3\text{He}$ . Приведенный в качестве примера на рисунке  $\gamma$ -спектр показывает, что идентификация изотопов  $^{44}\text{Sc}$  и  $^{46}\text{Sc}$  по энергии  $\gamma$ -лучей и периоду полураспада является надежной. На основе измеренных выходов изотопов  $^{44}\text{Sc}$  и  $^{46}\text{Sc}$ , образовавшихся в реакциях  $^{45}\text{Sc} (^3\text{He}, 2p) ^{46}\text{Sc}$  и  $^{45}\text{Sc} (^3\text{He}, \alpha) ^{44}\text{Sc}$ , были определены сечения их образования. Реакции слияния ( $^3\text{He}, xn$ ) нами не были изучены из-за коротких периодов полураспада образующихся в них продуктов, распад которых, за исключением  $^{45}\text{V}$ , завершается стабильными изотопами  $\text{Ti}$ .

В табл. 2 показаны возможные каналы реакций, приводящие к образованию изотопов  $^{43}\text{Sc}$ ,  $^{44g}\text{Sc}$ ,  $^{44m}\text{Sc}$ ,  $^{46}\text{Sc}$  и  $^{45}\text{Ti}$ , а также значения  $Q$  и пороги этих каналов реакций, рассчитанные с использованием  $Q$ -калькулятора [9].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведены зависимости сечений образования изотопов  $\text{Sc}$  от энергии бомбардирующих частиц  $^3\text{He}$ , обычно именуемые функциями возбуждения определенного канала реакции или образования конкретного продукта реакции. Опираясь на экспериментальные данные по функциям возбуждения с образованием изотопов  $^{43}\text{Sc}$ ,  $^{44g+m}\text{Sc}$  и  $^{46}\text{Sc}$  и табл. 2, можно заключить, что для каждого из перечисленных изотопов преобладающей является только одна из перечисленных реакций. А именно,  $^{43}\text{Sc}$  мог образоваться в реакции  $^{45}\text{Sc} (^3\text{He}, \alpha n) ^{43}\text{Sc}$ , реакция  $^{45}\text{Sc} (^3\text{He}, \alpha) ^{44}\text{Sc}$  могла привести к образованию  $^{44g}\text{Sc}$  и  $^{44m}\text{Sc}$ , а  $^{46}\text{Sc}$  мог образоваться в реакции  $^{45}\text{Sc} (^3\text{He}, 2p) ^{46}\text{Sc}$ . На этом же рисунке показаны расчеты функций возбуждения для этих конкретных каналов реакций в предположении статистического подхода, что из образовавшегося компаунд-ядра  $^{48}\text{V}$  испаря-

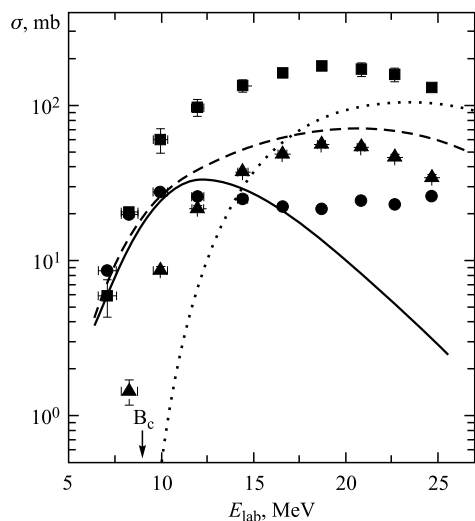


Рис. 2. Функции возбуждения продуктов реакции  $^{45}\text{Sc} + ^3\text{He}$ . Сечения реакций представлены символами: квадраты — сечения реакции  $^{45}\text{Sc} (^3\text{He}, 2p) ^{46}\text{Sc}$ , треугольники —  $^{45}\text{Sc} (^3\text{He}, \alpha n) ^{43}\text{Sc}$  и кружки —  $^{45}\text{Sc} (^3\text{He}, \alpha) ^{44}\text{Sc}$ . Кривыми представлены расчеты сечений для этих же реакций по коду ALICE-MP (сплошная — для  $^{44}\text{Sc}$ , пунктирная — для  $^{43}\text{Sc}$ , штриховая — для  $^{46}\text{Sc}$ )

ются различные заряженные частицы и нейтроны, приводя к исследуемому ядру- остатку. Однако из сравнения экспериментальных данных с расчетами видно, что в данных реакциях мы имеем дело с другими механизмами реакций, приводящих к образованию изотопов Sc. Скорее всего, изотопы  $^{44}\text{Sc}$  и  $^{46}\text{Sc}$  образуются в реакциях однонуклонных передач, именуемых в случае легких бомбардирующих частиц реакциями срыва ( $^{46}\text{Sc}$ ) и подхвата ( $^{44}\text{Sc}$ ). Обе эти реакции за счет положительного значения  $Q$  реакции хорошо проявляются при энергии  $^3\text{He}$  ниже кулоновского барьера реакции. В случае передачи ядру мишени —  $^{45}\text{Sc}$  — нейтрона с  $^3\text{He}$  функция возбуждения для  $^{46}\text{Sc}$  имеет характерное поведение для реакций передачи одного нейтрона при взаимодействии стабильных ядер и не чувствует кулоновский барьер, как это наблюдается в случае взаимодействия с дейтроном или  $^6\text{He}$  [3]. Несколько необычно ведет себя функция возбуждения реакции, когда образуется  $^{44}\text{Sc}$ . Несмотря на большое положительное значение  $Q$  (+9,254 МэВ) для реакции  $(^3\text{He}, \alpha)$  наблюдается четкий максимум функции возбуждения на кулоновском барьере реакции. Конкуренция с другим каналом  $(^3\text{He}, \alpha n)$  проявляется при энергии выше кулоновского барьера, однако канал подхвата нейтрона ядром  $^3\text{He}$  продолжает сохраняться с заметным сечением, как, например, и в реакции  $^{59}\text{Co} + ^3\text{He}$  [10, 11].

В измеренные сечения реакций с образованием  $^{45}\text{Ti}$  могут вносить вклад реакции  $^{45}\text{Sc}(^3\text{He}, p2n)^{45}\text{Ti}$ ,  $^{45}\text{Sc}(^3\text{He}, t)^{45}\text{Ti}$ , а также с образованием  $^{45}\text{V}$  —  $^{45}\text{Sc}(^3\text{He}, 3n)^{45}\text{V}$ , который распадается с  $T_{1/2} = 0,5$  с в  $^{45}\text{Ti}$ . Однако в случае реакций на легких частицах и легких ядрах мишени каналы с испусканием заряженной частицы идут с сечениями в несколько раз с большими, чем с испарением нейтронов [12, 13]. Поэтому  $^{45}\text{Ti}$  в основном образуется в реакциях  $(^3\text{He}, p2n)$  и  $(^3\text{He}, t)$ , причем по значению  $Q$  преимущество имеет зарядовообменная реакция  $(^3\text{He}, t)$ .

На рис. 3 приведена функция возбуждения реакции  $^{45}\text{Sc}(^3\text{He}, t)^{45}\text{Ti}$  и расчеты, выполненные с использованием кодов PACE-4 и ALICE-MP, основанных на равновесном

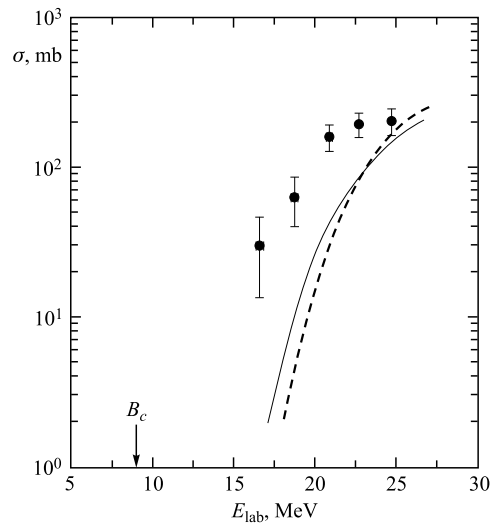


Рис. 3. Функция возбуждения реакции  $^{45}\text{Sc}(^3\text{He}, t)^{45}\text{Ti}$ . Кривыми представлены расчеты сечений как функция энергии  $^3\text{He}$  с использованием кодов PACE-4 (штриховая кривая) и ALICE-MP (сплошная)

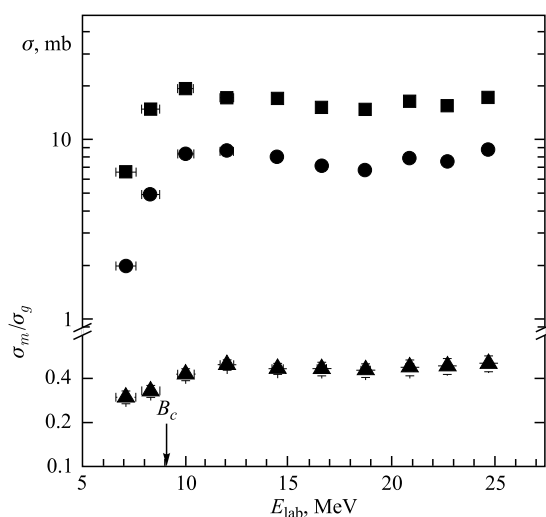


Рис. 4. Функции возбуждения образования продуктов реакции  $^{45}\text{Sc}(^3\text{He}, \alpha)^{44}\text{Sc}$  в основном  $2^+$  (квадраты) и изомерном  $6^+$  (кружки) состояниях и изомерное отношение  $\sigma_m/\sigma_g$  для  $^{44}\text{Sc}$  (треугольники) как функция энергии  $^3\text{He}$

статистическом рассмотрении слияния взаимодействующих ядер и девозбуждения составного ядра.

На рис. 4 представлены функции возбуждения для канала реакции  $^{45}\text{Sc}(^3\text{He}, \alpha)^{44}\text{Sc}$  с образованием  $^{44}\text{Sc}$  в основном  $^{44g}\text{Sc}$  ( $J = 2^+$ ) и изомерном  $^{44m}\text{Sc}$  ( $J = 6^+$ ) состояниях. На этом же рисунке внизу приведена зависимость изомерного отношения  $^{44m}\text{Sc}/^{44g}\text{Sc}$  от энергии бомбардирующих частиц  $^3\text{He}$ . Рост изомерного отношения в области энергий при приближении к кулоновскому барьеру указывает на то, что с ростом энергии  $^3\text{He}$  высоко лежащее состояние заселяется с большей вероятностью. При энергии выше кулоновского барьера изомерное отношение выполаживается, что указывает на то, что процесс передачи нейтрона ядру  $^3\text{He}$  с ядра мишени связан с малой энергией возбуждения остаточного ядра мишени. Хотя функция возбуждения реакции  $(^3\text{He}, \alpha)$  в области энергий  $^3\text{He}$  от 12 до 20 МэВ имеет некий изгиб, когда, вероятно, меняется механизм взаимодействия ядер и появляется возможность выбивания нейтрона из ядра мишени, все равно, реакция идет с малой передачей энергии этому ядру, приводя к возбуждению одночастичных состояний в ядре мишени. Аналогичная картина наблюдалась нами при бомбардировке  $^{197}\text{Au}$  ионами  $^6\text{He}$  с образованием  $^{196}\text{Au}$  в основном и изомерном состояниях ( $J = 12^-$  и  $2^-$  соответственно), где изомерное отношение также практически не менялось с ростом энергии  $^6\text{He}$  [14].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

- во взаимодействии слабосвязанных ядер четко проявляются каналы реакций, имеющих положительное значение  $Q$  реакции;
- в частности, при положительном значении  $Q$  реакции с большой вероятностью наблюдается передача нейтронов как ядру-мишени, так и ядру-снаряду;

— сечение реакции передачи нейтрона или кластера достигает своего относительного максимального значения на кулоновском барьере в случае образования одного из продуктов реакции плотно упакованного ядра или кластера, в данном случае  $\alpha$ -частицы.

Авторы выражают благодарность службам циклотрона У-120М за обеспечение работ на пучке  $^3\text{He}$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (10-02-00271), а также грантом полномочного представителя правительства Чехии в ОИЯИ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Liang J. F., Signorini C.* Fusion Induced by Radioactive Ion Beams Inter // *J. Mod. Phys. E.* 2005. V. 14, No. 8. P. 1121–1150.
2. *Penionzhkevich Yu. E. et al.* Excitation Functions of Fusion Reactions and Neutron Transfer in the Interaction of  $^6\text{He}$  with  $^{197}\text{Au}$  and  $^{206}\text{Pb}$  // *Eur. Phys. J. A.* 2007. V. 31, No. 2. P. 185–194.
3. *Skobelev N. K. et al.* Excitation Functions for the Radionuclide  $^{46}\text{Sc}$ , Produced in the Irradiation of  $^{45}\text{Sc}$  with Deuterons and  $^6\text{He}$  // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 2011. V. 38. P. 035106.
4. *Penionzhkevich Yu. E. et al.* Complete and Incomplete Fusion of  $^6\text{Li}$  Ions with Bi and Pt // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 2009. V. 36. P. 025104;  
*Shrivastava A. et al.* Exploring Fusion at Extreme Sub-Barrier Energies with Weakly Bound Nuclei // *Phys. Rev. Lett.* 2009. V. 103. P. 232702.
5. <http://www.nds.iaea.org/medical/tih48v0.html>
6. *Chu S. Y. F., Ekström L. P., Firestone R. B.* The Lund/LBL Nuclear Data. Search Version. 1999; <http://nucldata.nuclear.lu.se/nucldata/toi/>.
7. *Ziegler J. F., Biersack J. P., Ziegler M. D.* SRIM — the Stopping and Range of Ions in Matter. SRIM code. <http://www.srim.org/>.
8. *Tarasov O. B., Bazin D.* LISE++: Radioactive Beam Production with In-Flight Separators // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2008. V. 266. P. 4657–4664; <http://groups.nsl.msui.edu/lise/>.
9. <http://www.nndc.bnl.gov/qcalc/>
10. *Nagame Y. et al.* Pre-equilibrium Process in  $^3\text{He}$ -Induced Reactions on  $^{59}\text{Co}$ ,  $^{100}\text{Ag}$ ,  $^{181}\text{Ta}$  and  $^{209}\text{Bi}$  // *Nucl. Phys. A.* 1988. V. 486. P. 77–90.
11. *Fenyvesi A., Tárkányi F., Heselius S.-J.* Excitation Functions of Nuclear Reactions Induced by  $^3\text{He}$ -Particle on Cobalt // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2004. V. 222. P. 355–363.
12. *Go M. K., Markowitz S. S.* Test of the Independence Postulate in the Bohr Theory of Compound-Nucleus Decay:  $^{50}\text{Cr}^*$  System // *Phys. Rev. C.* 1973. V. 7. P. 1464–1470.
13. *Bissem H. H., Georgi R., Scobel W.* Entrance and Exit Phenomena in  $d$ - and  $^3\text{He}$ -Induced Preequilibrium Decay // *Phys. Rev. C.* 1980. V. 22. P. 1468–1484.
14. *Kulko A. A. et al.* Isomeric Ratios for  $^{196,198}\text{Tl}$  and  $^{196,198}\text{Au}$  from Fusion and Transfer in the Interaction of  $^6\text{He}$  with  $^{197}\text{Au}$  // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 2007. V. 34. P. 2297–2306.

Получено 15 ноября 2012 г.